

К - 562

2-81-738

КОВАЛЕНКО  
Сергей Григорьевич

КВАНТОВОХРОМОДИНАМИЧЕСКАЯ  
ПАРТОННАЯ МОДЕЛЬ  
В ЖЕСТКИХ  
ЛЕПТОН-НУКЛОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Специальность 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук

П.С. Исаев.

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

А.В. Ефремов,

доктор физико-математических наук  
профессор

М.П. Рекало.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт  
физики высоких энергий, Серпухов.

Автореферат разослан "6" января 1982 года.

Защита диссертации состоится "10" февраля 1982 года  
на заседании Специализированного совета К0.47.01.01 Лаборатории  
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,  
г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

В.И. Журавлев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время имеются веские основания считать квантовую хромодинамику (КХД) правильной теорией сильных взаимодействий элементарных частиц.

Присущее этой теории свойство асимптотической свободы<sup>/1/</sup> выделяет класс т.н. жестких процессов, для исследования которых применимы методы, основанные на теории возмущений. Проверка справедливости важнейших положений КХД в значительной мере связана с теоретическим и экспериментальным изучением таких процессов.

Особое место среди них занимает глубоконеупругое рассеяние, инклюзивные характеристики которого служат источником ценной информации о структуре и свойствах адронной материи в малых пространственно-временных масштабах<sup>/2/</sup>.

В основе современного понимания динамики глубоконеупругих взаимодействий лежат представления о партонной структуре адронов, впервые выдвинутые Фейнманом<sup>/3/</sup>. Квантовополевое объяснение этих представлений было найдено в КХД. Однако вытекающая из данной теории партонная модель<sup>/4-7/</sup> отличается от обычной Фейнмановской модели. Функции распределения кварков и глюонов в адронах зависят в КХД не только от бёркеновской переменной  $x$ , но также и от квадрата переданного адрону 4-импульса  $Q^2$ . В рамках теории возмущений были получены эволюционные уравнения<sup>/8,9/</sup>, которым подчиняются функции распределения кварков и глюонов в КХД. Такая модификация Фейнмановской модели, зачастую называемая КХД- партонной моделью, служит в настоящее время основой для анализа глубоконеупругих процессов. Между тем в данной модели существует значительный функциональный произвол, связанный с теоретической неопределенностью начальных условий эволюционных уравнений. Начальные условия не являются предметом теории возмущений и пока не могут быть вычислены строго в рамках КХД. Для их задания требуется привлечение дополнительной информации, например, в виде физически содержательных моделей, построенных в согласии с основными положениями КХД. Выбор определенных на-

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Библиотека

чальных условий приводит к некоторой конкретной реализации КХД-партонной модели.

Решения эволюционных уравнений можно представить числовыми таблицами, воспользовавшись тем или иным численным алгоритмом их нахождения /10/. Однако такое представление неудобно для использования в приложениях, область его применимости существенно ограничена. В связи с этим вопрос о наиболее рациональном представлении предсказаний КХД для глубокоэластичных процессов развивался в последнее время в направлении поиска приближенных решений эволюционных уравнений в явном аналитическом виде /11-13/.

Значительный прогресс достигнут также в изучении жестких упругих и квазиупругих лептон-адронных процессов. В рамках КХД было показано, что асимптотическое ( $Q^2 \rightarrow \infty$ ) поведение адронных формфакторов определяется механизмом жесткого перерассеяния кварков, т.е. эффектами малых расстояний /14-18/. Тем самым было обосновано применение в данном вопросе методов теории возмущений. На этой основе удалось воспроизвести в КХД правила размерного кваркового счета /19/ с точностью до логарифмического фактора. Были выполнены конкретные расчеты электромагнитных формфакторов  $\pi$ -мезона /14-17/, векторных мезонов /16/, барионов /18/, /20/.

Однако экстраполяция формул, основанных на механизме жесткого перерассеяния, в область умеренных передач приводит к разногласию с экспериментальными данными. В связи с этим было высказано предположение о том, что упомянутые формулы носят сугубо асимптотический характер и при экспериментально достигнутых значениях  $Q^2$  на поведение упругих и квазиупругих процессов существенное влияние оказывает область кваркового конфайнмента /21/. Поскольку протекающие в ней явления не могут быть учтены строго в рамках КХД, приобретает актуальность разработка феноменологических подходов для их учета. Это позволяет изучить некоторые аспекты динамики указанных процессов, привлекая наряду с теоретическими предпосылками имеющиеся экспериментальные данные.

Одна из возможностей феноменологического учета эффектов конфайнмента состоит в применении правил сумм дисперсионного типа. Такой подход /22/ с успехом был применен к изучению процессов  $e^+e^-$ -аннигиляции, масс и ширины распада мезонов.

Цель работы — построение конкретной реализации квантовохромодинамической партонной модели; получение приближенных решений эволюционных уравнений КХД в явном аналитическом виде; разработка подхода к упругим и квазиупругим лептон-нуклонным процессам при умеренных передачах

на основе конечноэнергетических правил сумм; расчет сечений, структурных функций, формфакторов глубокоэластичных, квазиупругих и упругих лептон-нуклонных процессов; применение полученных результатов для описания экспериментальных данных.

#### НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

В диссертации построена феноменологическая модель начальных условий эволюционных уравнений КХД. Основу модели составляют естественные с точки зрения КХД предположения о кварк-глюонной структуре адронов. В результате определения начальных условий получена конкретная реализация КХД - партонной модели.

В явном аналитическом виде найдены приближенные решения эволюционных уравнений в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД - теории возмущений.

Проведен анализ влияния поправок второго порядка КХД - теории возмущений на поведение структурных функций глубокоэластичного лептон-нуклонного рассеяния.

Вычислены структурные функции и сечения глубокоэластичного  $e(\mu)P$ - $e(\mu)d^-$ ,  $\nu(\bar{\nu})N$  - рассеяния, инклюзивного рождения очарованных частиц в  $\nu(\bar{\nu})N$  - взаимодействиях. Расчеты проведены с учетом кинематических эффектов в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД - теории возмущений.

Предложены правила сумм конечноэнергетического типа для структурных функций лептон-нуклонного рассеяния.

Для их формулировки использована новая скейлинговая переменная, феноменологически учитывающая некоторые эффекты конфайнмента.

На основе предложенных правил оум развит дуальный подход к упругим и квазиупругим лептон-нуклонным процессам при умеренных  $Q^2$ . В рамках подхода получена партоноподобная картина этих процессов, установлена связь формфакторов с функциями распределения валентных кварков в нуклоне, рассчитаны слабые и электромагнитные формфакторы нуклона, полные сечения реакций  $\nu + p \rightarrow \mu^- + \Delta^{++}, C_1^{++}$ ;  $\nu + n \rightarrow \mu^- + C_0^+$  ( $C_1^{++}$ ,  $C_0^+$  - очарованные барионы). Предсказания хорошо согласуются с экспериментальными данными.

#### ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫДВИГАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Построена статистическая партонная модель с реджевской асимптотикой.

2. Получена конкретная реализация квантовохромодинамической партонной модели посредством задания начальных условий эволюционных

уравнений КХД на основе статистической партонной модели с реджевской асимптотикой.

3. В явном аналитическом виде найдены функции распределения кварков и глюонов в нуклоне, с высокой точностью удовлетворяющие эволюционным уравнениям КХД в главном логарифмическом приближении и следующем порядке теории возмущений.

4. Получены предсказания КХД-партонной модели для структурных функций и сечений глубокоэластичного  $e(\mu) p \rightarrow e(\mu) d + \nu(\bar{\nu}) N$  - рассеяния, инклюзивного рождения очарованных частиц в  $\nu(\bar{\nu}) N$  - взаимодействиях. Расчеты проведены в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД-теории возмущений. Учтены кинематические массовые и пороговые эффекты. Предсказания хорошо согласуются с широкой совокупностью экспериментальных данных.

5. Предложены правила сумм конечноэнергетического типа для структурных функций лептон-нуклонного рассеяния.

6. Разработан дуальный подход к упругим и квазиупругим лептон-нуклонным процессам при умеренных  $Q^2$ . Основу подхода составляют предложенные правила сумм, в которых использована новая скейлинговая переменная, феноменологически учитывающая некоторые эффекты конфайнмента.

В рамках дуального подхода получена партоноподобная картина упругих и квазиупругих лептон-нуклонных процессов, установлена связь их формфакторов с функциями распределения валентных кварков в нуклоне, рассчитаны слабые и электромагнитные формфакторы нуклона, полные сечения резонансного рождения  $\Delta^{++}$  - изобары и очарованных  $C_s^{++}, C_s^+$  - барионов в  $\nu(\bar{\nu}) N$  - взаимодействиях. Предсказания хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

#### Апробация диссертации

Основные материалы диссертации докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики, Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, на сессиях ОЯФ АН СССР, на всесоюзных и международных конференциях.

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 статей.

#### Объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит

128 страниц машинописного текста, 20 рисунков, 3 таблицы и библиографический список литературы из 163 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор современного состояния теории жестких взаимодействий лептонов с адронами, основанной на квантовой хромодинамике. Обсуждается актуальность вопросов, затронутых в диссертации.

Первая глава посвящена построению статистической партонной модели с реджевской асимптотикой, предсказания которой используются для задания начальных условий эволюционных уравнений КХД.

В § 1 рассмотрены общие вопросы применения КХД к изучению глубокоэластичного рассеяния. Даны стандартные определения функций распределения кварков и глюонов в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД-теории возмущений. Приведены эволюционные уравнения, которым они подчиняются, указаны формулы, связывающие их со структурными функциями.

В § 2 сформулированы основные положения статистической партонной модели с реджевской асимптотикой. Модель исходит из предположения о возможности восстановления функций распределения  $f_v, f_s$  и  $f_g$  соответственно валентных, морских кварков и глюонов во всем интервале изменения бёркеновской переменной ( $0 \leq x \leq 1$ ) по их поведению в окрестности  $x \sim 0$ , т.е.

$$f_i(x, Q^2) = \hat{A}^{(i)}(\bar{f} | x), \quad x \in [0, 1], \quad (I)$$

где

$$f_i(x, Q^2) \xrightarrow{x \rightarrow 0} \bar{f}_i(x, Q^2).$$

Область малых значений  $x$  характеризуется большой множественностью партонов и отсутствием кинематических корреляций между ними. Кроме того,  $x \rightarrow 0$  соответствует реджевскому пределу  $\nu \rightarrow \infty, Q^2 = \text{const}$ . Это позволяет привлечь к нахождению предельных функций распределения  $\bar{f}_i$  кварков и глюонов некоторые положения статистической теории и реджевский анализ. Экстраполирующие операторы  $\hat{A}_i$  построены в рамках статистического партонного подхода Бьеркена, Паскоса<sup>/23/</sup> и Кути, Вайскофа<sup>/24/</sup>, сформулированного в лоренцевой системе отсчета бесконечного импульса адрона (IMF). Вид операторов  $\hat{A}_i$  получен исходя из ряда естественных с точки зрения КХД предположений о кварк-глюонной структуре адронов.

В § 3 исследуются расходимости, возникающие в результате формального применения операторов  $\hat{A}_i$  к предельным функциям распределения  $f_i$ , заданным в реджевской форме. Причиной их возникновения является неограниченность числа морских кварк-антикварковых пар и глюонов. Наличие условий нормировки для функций распределения  $f_i$  позволило последовательно исключить все расходимости из наблюдаемых величин.

В § 4 получены конечные нормированные выражения для функций распределения кварков и глюонов в различных адронах. Нуклонные распределения имеют вид:

$$f_v(x, a_0^2) = \frac{x^{-1/2}(1-x)^{\tau_2(a_0^2)}}{B(1/2, \tau_2(a_0^2)+1)} \cdot D_q^{(2)}(1-x, a_0^2),$$

$$f_s(x, a_0^2) = \frac{\tau_1(a_0^2) - \tau_2(a_0^2)}{8x} (1-x)^{\tau_1(a_0^2) + \frac{1}{2}} D_q^{(3)}(1-x, a_0^2), \quad (2)$$

$$f_g(x, a_0^2) = \frac{\tau_2(a_0^2)}{x} e^{-\beta_g(a_0^2) \cdot x} (1-x)^{\tau_1(a_0^2) + \frac{1}{2}} D_g^{(3)}(1-x, a_0^2),$$

где

$$D_i^{(k)}(y, a_0^2) = \frac{\Phi(\tau_2(a_0^2), \tau_1(a_0^2) + \frac{k}{2}; -\beta_i(a_0^2) \cdot y)}{\Phi(\tau_2(a_0^2), \tau_1(a_0^2) + \frac{3}{2}; -\beta_i(a_0^2))}$$

$\Phi(\alpha, \beta; \xi)$  - вырожденная гипергеометрическая функция.

Во второй главе приближенно решены эволюционные уравнения КХД, на основе полученных решений изучены некоторые глубокоэластичные лептон-нуклонные процессы.

В § 1 с помощью вариационного метода пробных функций получены в явном аналитическом виде приближенные решения эволюционных уравнений в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД-теории возмущений. В ряде известных подходов /11-13/ для задания начальных условий эволюционных уравнений, а также вида  $\mathcal{C}$ -зависимости их приближенных решений используются не несущие реальной смысловой нагрузки эмпирические параметризации экспериментальных данных. Подход, излагаемый в настоящем параграфе, не опирается на подобные эмпирические параметризации, а исходит из предсказаний статистической партонной модели с реджевской асимптотикой. Это позволяет достичь большей общности в изучении различных глубокоэластичных процес-

сов, сохранить многие связи, существующие между ними, и получить удобную в приложениях конкретную реализацию КХД-партонной модели.

В качестве начальных условий эволюционных уравнений использованы выражения (2). Приближенные решения выбраны в том же виде, но с параметрами, зависящими от  $Q^2$ . Эта зависимость задана в линейном приближении по стандартной эволюционной переменной  $S$ :

$$\begin{aligned} \tau_i(Q^2) &= \tau_i^{(0)} + \tau_i^{(1)} \cdot S, \\ \beta_i(Q^2) &= \beta_i^{(0)} + \beta_i^{(1)} \cdot S, \\ S &= -\ln(\bar{q}^2(Q^2)/\bar{q}^2(a_0^2)). \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\bar{q}^2(Q^2)$  - "бегущая" константа кварк-глюонного взаимодействия. Параметры  $\tau_i^{(0)}, \beta_i^{(0)}$  определены из экспериментальных данных,  $\tau_i^{(1)}, \beta_i^{(1)}$  рассчитаны исходя из эволюционных уравнений. Выражения (2) с параметрами, найденными в форме (3), представляют собой приближенные решения эволюционных уравнений КХД. Как показал анализ, погрешности найденных приближенных решений не превышают 7-8% вплоть до  $Q^2 \sim 28 \cdot 10^3 \text{ ГэВ}^2$ . При уменьшении  $Q^2$  погрешности убывают.

В § 2 изучен вопрос о влиянии поправок второго порядка КХД - теории возмущений на поведение структурных функций глубокоэластичного лептон-нуклонного рассеяния. Установлен относительный вклад поправок в различных кинематических областях.

В § 3-5 на основе полученных приближенных решений рассчитаны структурные функции, сечения и другие характеристики глубокоэластичного рассеяния поляризованных и неполяризованных электронов ( $\mu$ -мезонов) на протонах и дейтронах, нейтрино и антинейтрино на нуклонах в канале заряженных и нейтральных токов, а также процесса инклюзивного образования очарованных частиц в (анти-)нейтрино-нуклонных взаимодействиях. Расчеты проведены в главном логарифмическом приближении и следующем порядке КХД-теории возмущений. Учтены кинематические массовые и пороговые эффекты. Структурные функции дейтрона найдены с учетом фермиевского движения составляющих его нуклонов. Показано, что полученные предсказания находятся в хорошем согласии с широкой совокупностью экспериментальных данных.

В третьей главе развит дуальный подход к упругим и квазиупругим лептон-нуклонным процессам при умеренных  $Q^2$ .

В § 1 предложены правила сумм конечноэнергетического типа (ПСКЗ/25/) для структурных функций лептон-нуклонного рассеяния

$$\int_{a_+(Q^2)}^{a_-(Q^2)} d\tilde{\xi} \cdot \{F_i(\tilde{\xi}, Q^2) - \tilde{z} F_i^s(\tilde{\xi}, Q^2)\} = 0. \quad (4)$$

где  $F_i$  - наблюдаемые на опыте структурные функции, содержащие вклады всех возможных резонансов,  $F_i^s$  - гладкие теоретические структурные функции, вычисляемые на основе КХД-теории возмущений. Интегрирование в (4) проводится по окрестности отдельного резонанса. Эти соотношения выражают свойство локальной дуальности в лептон-нуклонном рассеянии и по форме аналогичны хорошо известным блум-гилмановским правилам сумм<sup>/26/</sup>. В целях повышения точности правил сумм (4) введена новая скейлинговая переменная  $\tilde{\xi}$ , феноменологически учитывающая некоторые эффекты конфайнмента:

$$\tilde{\xi}(\nu, Q^2) = \xi \cdot \left[ 1 + \frac{M_0^2}{Q^2} \left( 1 + \frac{M_0^2}{1 + Q^2/M_0^2} \right) \right],$$

$$a_{\pm}(Q^2) = \tilde{\xi}(\nu_{\pm}, Q^2), \quad \nu_{\pm} = [Q^2 + (M_R \pm \Delta)^2 - M^2] / 2M. \quad (5)$$

Здесь  $M_0$  - характерный адронный масштаб;  $\xi$  - скейлинговая переменная Джорджи-Политцера<sup>/27/</sup>, учитывающая кинематические массовые эффекты;  $M, M_R$  - массы нуклона-мишени и образовавшегося во взаимодействии резонанса;  $\Delta$  - пределы охвата резонанса (интервал дуальности).

На основе вильсоновских операторных разложений в рамках подхода работы<sup>/27/</sup> получена возможная КХД-интерпретация правил сумм (4) и переменной  $\tilde{\xi}$  (5).

В § 2 исходя из предложенных правил сумм развит дуальный подход к упругим и квазиупругим (резонансным) лептон-нуклонным процессам при умеренных  $Q^2$ . На его основе сформулирована партоноподобная картина этих процессов, установлена связь их формфакторов с функциями распределения валентных кварков в нуклоне.

§ 3 и § 4 посвящены расчету характеристик конкретных процессов в рамках дуального подхода: слабых и электромагнитных упругих формфакторов нуклонов, полных сечений реакций  $\nu + p \rightarrow \mu^- + \Delta^+(1232)$ ,  $C_1^{++}(2420)$  и  $\nu + n \rightarrow \mu^- + C_0^+(2260)$  ( $C_1^{++}$  и  $C_0^+$  - барионные резонансы с очарованием +1). Полученные предсказания хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

#### Результаты диссертации опубликованы в работах

1. В.В. Белокуров, П.С. Исаев, С.Г. Коваленко, В.Г. Малышкин. Модификация партонной модели Кути-Вайскопфа и глубоконеупругое лептон-нуклонное рассеяние. ЯФ, 1977, т. 26, с. 1073-1080.
2. П.С. Исаев, С.Г. Коваленко. Кварк-партонная модель с нарушенным скейлингом и глубоконеупругое рассеяние. В кн.: Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978, с. 229-235.
3. С.Г. Коваленко. Глубоконеупругое  $e(\mu)d$ -рассеяние и партонная модель с нарушенным скейлингом. Дубна, 1978, 22 с. (Препринт/ОИЯИ, P2-II805).
4. С.Г. Коваленко, В.Г. Малышкин. Партонная модель глубоконеупругого рассеяния с нарушенным скейлингом. ЯФ, 1979, т. 30, с. 1647-1656.
5. П.С. Исаев, С.Г. Коваленко. Модель с логарифмически нарушенным скейлингом и нейтринные взаимодействия при высоких энергиях. ЯФ, 1980, т. 32, с. 756-763.
6. П.С. Исаев, С.Г. Коваленко. Инклюзивные и эксклюзивные лептон-нуклонные процессы в кварк-партонной модели с нарушенным скейлингом. В кн.: Труды III международного семинара по проблемам физики высоких энергий и квантовой теории поля. Протвино, 1980, с. 352-370.
7. P.S. Isaev, S.G. Kovalenko. A model with logarithmic scaling violation and high-energy lepton-hadron interactions. *Nuclonic Journal*, 1980, v 3, p. 919-939.
8. С.Г. Коваленко. Локальная дуальность в квантовой хромодинамике и эксклюзивные лептон-нуклонные процессы. Дубна, 1980, 15с. (Сообщение/ОИЯИ, P2-80-499).
9. И.С. Златев, Ю.П. Иванов, П.С. Исаев, С.Г. Коваленко. Приближенное решение эволюционных уравнений квантовой хромодинамики. Дубна, 1981, 15 с. (Препринт/ОИЯИ, P2-81-557).
10. В.А. Бедняков, И.С. Златев, П.С. Исаев, С.Г. Коваленко. Приближенное решение эволюционных уравнений КХД с радиационными поправками. Дубна, 1981, 22с. (Сообщение/ОИЯИ, P2-81-557).

#### Литература

1. H.D. Politzer. Reliable Perturbative Results for strong interactions. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, v. 30, p. 1346-1349.

2. A.A. Logunov, M.A. Mestvirishvili, Nguen Van Hieu. High energy behaviour of inelastic cross sections. Phys. Lett., 1967, 25B, p. 611-614.
3. P. Фейнман. Взаимодействие фотонов с адронами. Мир., М., 1975.
4. A.V. Efremov, A.V. Radyushkin. High momentum transfer processes in QCD. Dubna, 1978, 20 p. (preprint/JINR, E2-II535).
5. A.B. Ефремов, А.В. Радюшкин. Теоретико-полевой подход к процессам с большой передачей импульса. ТМФ, 1980, т. 44, с. 17-33.
6. R.K. Ellis, H. Georgi, M. Machacek, H.D. Politzer, G.G. Ross. Perturbation theory and the parton model in QCD. Pasadena, 1978, 68p. (preprint/Caltech. CALT-68-884).
7. A.H. Mueller. Cut vertices and their renormalization: a generalization of the Wilson expansion. Phys. Rev., 1978, D18, p. 3705-3727.
8. А.Н. Липатов. Партонная модель и теория возмущений. ЯФ, 1974, т. 20, с. 181-197.
9. G. Altarelli, G. Parisi. Asymptotic freedom in parton language. Nucl. Phys., 1977, B126, p. 298-318.
10. G. Fox. Phenomenology of asymptotically free theories in deep inelastic scattering. Pasadena, 1977, 55p. (Preprint/Caltech., CALT-68-614).
11. A.J. Buras, K. Gaemers. Simple parametrizations of parton distributions with  $Q^2$  dependence given by asymptotic freedom. Nucl. Phys., 1978, B132, p. 249-267.
12. G. Parisi, N. Suralas. A simple parametrization of the  $Q^2$  dependence of the quark distribution in QCD. Nucl. Phys., 1979, B151, p. 421-428.
13. A. Bialas, A.J. Buras. Simple quantum-chromodynamic parametrization of parton distributions beyond the leading order of asymptotic freedom. Phys. Rev., 1980, D21, p. 1825-1833.
14. A.V. Efremov, A.V. Radyushkin. Asymptotical behaviour of

- pion electromagnetic form factor in QCD. Dubna, 1978, 32 с. (Preprint/JINR, E2-II983).
15. A.B. Ефремов, А.В. Радюшкин. Асимптотика формфактора пиона в квантовой хромодинамике. ТМФ, 1980, т. 42, с. 147-166.
16. S.J. Brodsky, G.P. Lepage. Exclusive processes in quantum chromodynamics: evolution equations for hadronic wavefunctions and the form factors of mesons. Phys. Lett., 1979, 87B, p. 359-365.
17. A. Duncan, A.H. Mueller. Asymptotic behavior of composite-particle form factors and renormalization group. Phys. Rev., 1980, D21, p. 1636-1665.
18. S.J. Brodsky, G.P. Lepage. Exclusive processes in quantum chromodynamics: the form factors of baryons at large momentum transfer. Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, p. 545-551.
19. V.A. Matveev, R.M. Muradyan, A.N. Tavkhelidze. Automodelizm in the large-angle elastic scattering and the structure of hadrons. Lett. Nuovo Cimento, 1973, v. 7, p. 719-724.
20. I.G. Aznauryan, S.V. Esaybegyan, N.L. Ter-Isaakyan. On the asymptotics of the nucleon form factors in the quark-gluon model. Phys. Lett., 1980, 90B, p. 151-154.
21. A.B. Радюшкин. Формфактор пиона в квантовой хромодинамике. Дубна, 1980, Юс. (Препринт/ОИЯИ, P2-80-687).
22. V.A. Novikov, L.B. Okun, M.A. Shifman, A.I. Vainshtein, M.V. Voloshin, V.I. Zakharov. Charmonium and gluons. Phys. Rep., 1978, 41C, p. 1-133.
23. J.D. Bjorken, E.A. Paschos. Inelastic electron-proton and  $\gamma$ -proton scattering and the structure of the nucleon. Phys. Rev., 1969, v. 185, p. 1975-1982.
24. J. Kuti, V.F. Weisskopf. Inelastic lepton-nucleon scattering and lepton pair production in relativistic quark-parton model. Phys. Rev., 1971, D4, p. 3418-3439.
25. A.A. Logunov, L.D. Soloviev, A.N. Tavkhelidze. Dispersion

- sum rules and high energy scattering. Phys. Lett., 1967, 24B, p. I81-I82.
26. E.D. Bloom, F.J. Gilman. Scaling and the behavior of nucleon resonances in inelastic electron-nucleon scattering. Phys.Rev., 1971, D4, p. 2901-2916.
27. A.De Rujula, H. Georgi, H.D. Politzer. Demythification of electroproduction duality and precocious scaling. Ann. Phys., 1977, v. 103, p. 315-353.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 ноября 1981 года